

## Dimenzování superkapacitorů pro rekuperaci brzděné energie na základě simulace

M. Pácha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra výkonových elektrotechnických systémů, Elektrotechnická fakulta, ŽU v Žiline,  
Univerzitná 8215/1, Žilina  
E-mail : [matej.pacha@ieee.org](mailto:matej.pacha@ieee.org)

### Anotace:

Článek představuje metodu dimenzování superkapacitorů pro rekuperaci brzděné energie na tramvajových tratích MHD Bratislava. Simulační model je vytvořen podle teorie trakční mechaniky. Pro účely simulace je zvolen nejvhodnější traťový úsek pro rekuperaci a pro tento úsek jsou prezentovány výsledky pro cyklu rozjezd – jízda – zastavení.

The article deals with sizing of supercapacitors for recuperation of breaking energy of tramway line in Bratislava (Slovakia). Based on theory of traction mechanics, a simulation model is introduced. With reference to the tramway line plan and elevation profile, the most valuable line is selected for recuperation. Then, the simulation results are introduced, concluding a balance of energy with recuperation in one start – stop operation cycle.

### ÚVOD

S příchodem moderních technologií v oblasti akumulace elektrické energie se čím dál častěji zaměřuje pozornost na úspory energie tam, kde probíhá její obousměrná přeměna, tedy spotřeba i výroba. Zřejmě nejlepším příkladem je doprava uskutečňovaná elektrickou vozbou, kde se elektrická energie mění na kinetickou energii dopravního prostředku a při tzv. elektrodynamickém brzdění se kinetická energie přeměňuje zpět na elektrickou. Ještě před několika lety neexistovaly technologie, které by umožňovaly tuto energii uložit (akumulovat) pro pozdější použití. Akumulace energie velkých výkonů je umožněna až s příchodem superkapacitorů.



Obr. 1: Tramvaj typu T3 Mod s evidenčním číslem 7304 [1]  
V rámci úloh vyplývajících z projektu ITMS 26220220078 „Výskum vysoko úsporných komponentov elektrických pohonných systémů hnacích dráhových vozidiel a vozidiel MHD“ byla provedena studie využití rekuperace brzděné energie na tramvajových tratích MHD Bratislava, na kterých jezdí vozidla typu T3 Mod s asynchronním trakčním pohonem (Obr. 1). Uvažují se i varianty s umístěním

superkapacitoru na vozidle, ale zejména se počítá s rekonstrukcí vybrané napájecí stanice, která by sloužila jako zásobník energie pro daný napájecí úsek. Na zvolené trati potom byly provedeny simulace cyklu rozjezd – jízda – zastavení s ohledem na předpokládané vlastnosti trakční výzbroje pro rekuperaci energie. Cílem práce je zjistit množství energie z jednoho takového cyklu, které bude sloužit pro dimenzování akumulátoru energie v závislosti na dopravním toku a časové následnosti dopravy.

### SIMULAČNÍ MODEL JÍZDY TRAMVAJE

Pro vyšetřování přeměny energie při jízdě tramvaje (vlaku) je nutné respektovat vlivy, které se na přeměně podílejí. Vzhledem k neurčitosti a proměnlivosti některých dějů potom přistupujeme k zjednodušení na základě empirických vzorců, případně zanedbáváme některé jevy, které nemají na výsledek zásadní vliv. Základní principy trakční mechaniky jsou dobře známé a uvedené v mnoha publikacích (např. [2]). Omezíme se proto pouze na jejich aplikaci a na použitá zjednodušení. Základní rovnici tvoří rovnováha tažné síly  $F_t$  a souhrnné odporové síly  $F_o$  (1). Tažná síla je vyvíjena trakčním pohonem a je chápána jako součet sil hnacích náprav na styku kolo – kolejnice.

$$F_t - F_o = 0 \quad (1)$$

Mezi odporové síly řadíme zejména vozidlové a traťové odpory, brzdí sílu a sílu setrvačnou. Z praktických důvodů se nejčastěji tyto odpory uvádějí v poměrném tvaru, tj. vztažené k tíze  $G$  vozidla (2).

$$p_x = \frac{F_x}{G} = \frac{F_x}{9,81 \cdot M} \left[ \frac{N}{kN}; N, kN; N, t \right] \quad (2)$$

Vzhledem ke složitosti jevů ovlivňujících jízdu vozidla se potom tyto měrné odpory vyjadřují pomocí empirických vzorců (3) – (7). Uvedené veličiny vyjadřují poloměr čepu/ložiska nápravy  $r$ , poloměr kola  $R$ , součinitel tření ložiska  $\varphi$ , součinitel valivého tření  $B$ , součinitel tvaru vozidla  $c_t$ , hustotu vzduchu  $\rho$ , čelní plochu vozidla  $S$ , rychlost  $V$ , součinitel rotujících hmot  $\xi$ , zrychlení  $a$ , hmotnost vozidla  $m$  a stoupání tratě  $s$ . Bližší vysvětlení uvedených vztahů je možné najít např. v [2]. Běžně se uvádí tzv. redukovaný měrný traťový odpor, který slučuje odpor ze stoupání, odpor z oblouku a případně odpor z tunelu. Odpor z oblouku se udává jako přídavný odpor a udává se pro každý typ tratě zvlášť. Pro tratě s výrazným sklonem ale bývá odpor z oblouku relativně malý. Odpor z jízdy tunelem se udává pro krátké tunely mezi 1 a 2 N/kN.

Přestože se jedná o vztahy empirické a do značné míry zjednodušené, můžeme je použít pro vyšetřování přeměny energie při jízdě vozidla, a to s dostatečnou přesností. Pro účely vyšetřování přeměny energie při jízdě tramvaje byla sestavena pohybová rovnice (9), která vychází ze stanoveného měrného jízdního odporu vozidla typu T3 / T3 Mod [2]. Traťové poměry jsou vyjádřeny redukovaným traťovým odporem  $p_{\text{sed.}}$ . Brzdná síla je zde sdružena s tažnou silou  $F_t$ , přičemž v případě brzdění se změni znaménko síly.

**Složka smykového/valivého tření v ložiskách**

$$p_A = \frac{A}{G} = \frac{r}{R} \cdot \varphi \left[ \frac{N}{kN}; m, m, \frac{N}{kN} \right] \quad (3)$$

**Složka valivého tření kolo – kolejnice**

$$p_B = \frac{B \cdot V}{G} = b \cdot V \left[ \frac{N}{kN}; km/h \right] \quad (4)$$

**Složka tření o vzduch**

$$p_C = c_t \cdot \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \rho \cdot S \cdot \left( \frac{V}{3,6} \right)^2$$

$$p_C = C \cdot V^2 \left[ \frac{N}{kN}; km/h \right] \quad (5)$$

**Odpor ze setrvačnosti**

$$F_a = \xi \cdot F_{ap} = \xi \cdot m \cdot a \quad [N; 1, kg, m/s^2] \quad (6)$$

**Odpor ze stoupání**

$$p_s = \frac{F_s}{G} = \frac{G \cdot s}{G} = s \left[ \frac{N}{kN}; N, kN; \% \right] \quad (7)$$

Výsledný vztah vyjadřující silové poměry ve zjednodušeném modelu jízdy vozidla je následující (indexy sil odpovídají indexům měrných odporů,  $F_b$  je brzdná síla):

$$F_t = F_a + F_o + F_s + F_r + F_b \quad (8)$$

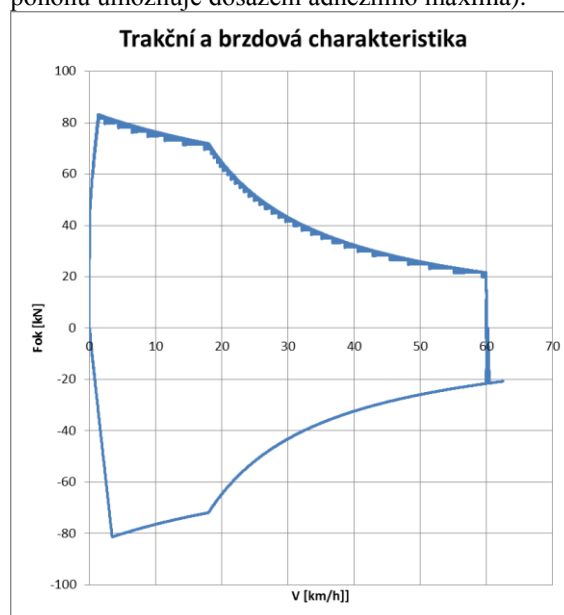
Pohybová rovnice pro vyšetřování přeměny energie při jízdě tramvaje:

$$F_t = m \cdot a \cdot \xi + \frac{m}{1000} \cdot 9,81 \cdot [(3,8 + 0,0008 \cdot V^2) + p_{\text{sed}}] \quad (9)$$

Pro výpočet spotřeby energie byla použita metoda integrace trakčního výkonu získaného simulací jízdy vozidla na daném úseku. Pohybová rovnice potom změni svůj tvar a dostáváme rovnici (10), kterou je možné použít pro přepis a použití v numerickém tvaru pro řešení pomocí výpočetní techniky.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m \cdot \xi} (F_t - \sum F_0) \quad (10)$$

Tažná síla je generována trakčním pohonem, který je v případě uvažovaného typu tramvaje tvořen asynchronním motorem napájeným ze střídače. Regulaci pohonu lze dosáhnout libovolnou tažnou silou z plochy trakční charakteristiky, a to jak v jízdě silou, tak i v režimu elektrodynamického brzdění. Pro účely simulace byla trakční a brzdná charakteristika zjednodušena do podoby na obrázku 2. Adhezní omezení počítá se střední kvalitou styku kolo – kolejnice podle Curtius-Knifflera [2], přičemž teoretické maximum tažné síly je vyšší (regulace pohonu umožňuje dosažení adhezního maxima).



Obr. 2: Trakční a brzdná charakteristika tramvaje T3 Mod

V reálném provozu je úkolem řidiče dodržovat předepsaný jízdní řád, traťovou rychlost a sledovat poměry na trati a následně zadávat tažnou nebo brzdnou sílu. Z pohledu simulace je tedy nutné vytvořit tuto zpětnou vazbu alespoň částečně, a to vytvořením regulátoru rychlosti, případně systémem cílového brzdění. V případě regulátoru rychlosti lze použít nelineární deterministický regulátor, který má za úlohu generovat požadované zrychlení na základě odchylky požadované a skutečné rychlosti (11) [3]. Parametrem je časová změna zrychlení, neboli „trhnutí“. Požadované zrychlení je potom omezeno

maximálním provozním zrychlením a zrychlením daným obalovou trakční charakteristikou.

$$a_{dem} = \pm \sqrt{2 \cdot b \cdot (v_{dem} - v_{real})} \quad (11)$$

V případě naší simulace jízdy tramvaje nebyl řešen systém cílového brzdění. Zastavení je zadáno nastavením nulové požadované rychlosti v určitém místě na trati, přičemž požadované zpomalení je konstantní a vozidlo (souprava) tak zastaví na požadovaném místě.

Parametry simulace, které je možné nastavit / ovlivnit jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Parametry simulace

Parametr	Výchozí hodnota
Traťové úseky pro rekuperaci	Viz odst. 3
Jm. výkon trakčních motorů	4x 90 kW
Rychlost nárůstu a poklesu $F_t$	10 %/s
Maximální zrychlení	1,3 m.s <sup>-2</sup>
Maximální zpomalení	1,12 m.s <sup>-2</sup>
Trhnutí	5 m.s <sup>-3</sup>
Měrný vozidlový odpor $p_0$ [N/kN]	3,8 + 0,0008.V <sup>2</sup>
Hmotnost vozidla	26 t
Součinitel rotujících hmot	1,2
Souhrnná účinnost pohonu	0,85
Délka soupravy	14 m
Traťové poměry	Viz odst. 3

## TRAŤOVÉ ÚSEKY PRO REKUPERACI

Vzhledem k tomu, že cíle výzkumu se orientují na uložení energie umístěné v napájecí stanici, bylo nutné vybrat v rámci tramvajové sítě MHD Bratislava vhodný traťový úsek s největší „hustotou“ výměny energie, tj. s největším a/nebo nejdelším spádem. Na takovém úseku se předpokládá vysoký brzdňvý výkon a vyšší hodnoty rekuperované energie. Podkladem byl plán sítě tramvajových linek MHD Bratislava a trojrozměrná mapa Bratislavy (Google Earth). Překrytím tramvajových linek a trojrozměrného modelu byly vytvořeny výškové profily tratí, které byly následně analyzovány. Přesnost výsledných profilů je na dostatečné úrovni. Chyby výškových profilů mohou být pozorovány jen v hustě zastavěných částech centra města (mosty, atd.)

Převážná většina tratí je vedena historickým centrem a převážně rovinatými částmi Bratislavy (směr Rača, Zlaté Piesky, Ružinov). Mírné sklony do 1% se nacházejí na všech úsecích. Jejich délka a rozmístění stanic ale nepředpokládá větší využití rekuperace. Největší sklon 7,2% lze nalézt u výjezdu z tunelu v ulici Kapucínska. Jeho délka (cca 80 m) a nízká rychlost soupravy při výjezdu z tunelu nezaručuje dobré využití akumulace rekuperované energie.

Sklonově nejvýraznější profil byl zaznamenán na trati do městské části Karlova Ves, resp. Dúbravka (linky č. 4, 5, 6 a 9. Příkladem je úsek mezi zastávkami Karlova Ves a Molecova, kde průměrný sklon dosahuje přibližně 5% při průměrné vzdálenosti

zastávek cca 350 m. Celková délka tohoto úseku je přibližně 2 km, přičemž sklon je v celém úseku větší než 3%. Vzhledem k podobnosti úseků mezi zastávkami byl zvolen úsek Borská – MÚ Karlova Ves, který vykazuje téměř konstantní sklon 5,4% na vzdálenosti 450 m (obr. 4). V současné době je zde traťová rychlost snížena na 10 až 30 km/h, ale simulace byly prováděny pro 40, 50 a 60 km/h (různé stavy dodržení jízdního řádu; nejvyšší dovolená rychlost může být až 60 km/h, tj. maximální dovolená rychlost v úsecích, kde je trať vedena na samostatném tělese).

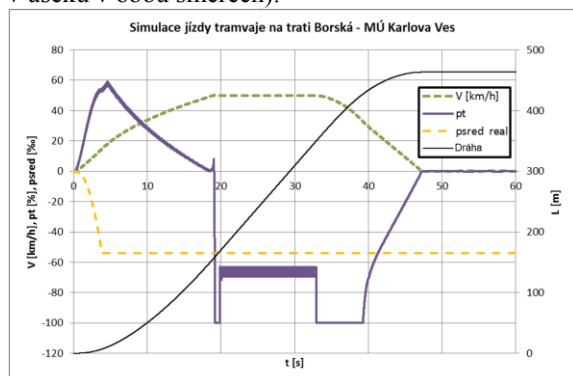
## VÝSLEDKY SIMULACÍ

Simulace byly provedeny v několika variantách provozu. Referenční variantou byla jízda po spádu na úseku Borská – MÚ Karlova Ves s cílovou rychlostí 50 km/h. Její průběh je uveden na obr. 3. Uvažuje se s nájездem do klesání, tj. reálný redukováný sklon postupně narůstá. Rychlost roste se zrychlením daným regulátorem rychlosti. Po dosažení rychlosti 50 km/h lze zaznamenat překmit brzdňého výkonu způsobený pomalejší reakcí regulátoru tahu (modelovaný omezením časové změny poměrného tahu). Tato špička nemá výrazný vliv na výslednou hodnotu brzdňé energie. Následuje interval regulace rychlosti, který je realizován elektrodynamickým brzděním (souprava jede na klesání). Ve vzdálenosti cca 100 m před zastávkou je zadána nulová žádaná rychlost a nastává brzdění maximálním brzdňým zpomalením. Při poklesu rychlosti pod určitou hodnotu klesá využití elektrodynamické brzdy a brzdění přebírá mechanická (vystřídací) brzda.

Výsledné teoretické hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Spotřebovaná energie je na úrovni 26% rekuperovatelné energie, což je dáno vysokou hodnotou sklonu (velká část jízdy je realizována brzděním). Záporná teoretická energetická bilance je podmíněná schopností akumulátoru energie absorbovat výkon přibližně 300 kW (při uvažování účinnosti trakčního pohonu 0,85 a účinnosti nabíječe 0,95). Pro účely celkové energetické bilance byla provedena simulace jízdy i v opačném směru, tedy proti spádu. Výsledná energetická bilance je na úrovni 2 kWh, což znamená úsporu energie přibližně 50% v porovnání se současným stavem, kdy rekuperace není využívána (součet spotřeby energie v obou směrech je 4,376 kWh). Rekuperovatelná energie neboli optimální kapacita akumulátoru energie na jedno zastavení je přibližně 2 kWh. [4]

Dále byly provedeny simulace jízdy v úsecích s nižšími sklony (0%, 0,5% a 1%) pojižděných rychlostí 40 a 60 km/h. Bylo zjištěno, že teoreticky rekuperovatelná energie dosahuje max. 5,4 kWh pro jízdu rychlostí 60 km/h na spádu 1%, přičemž výkon elektrodynamické brzdy je přibližně 300 až 330 kW. Dimenzování akumulátoru energie by mělo být předcházeno ověřovací simulací pro celý napájecí

úsek a při simulaci plného provozu (tj. více vozidel v úseku v obou směrech).



Obr. 3: Simulace jízdy tramvaje v úseku Borská – MÚ Karlova Ves

Tab. 2: Výsledky simulace jízdy tramvaje v úseku Borská – MÚ Karlova Ves

Parametr	Jízda po spádu	Jízda proti spádu
Rychlost	50 km/h	50 km/h
Čas	48 s	49 s
Šp. výkon na OK (Jízda / Brzda)	210 kW / 375 kW	210 kW / 375 kW
Spotřeba energie	0,494 kWh	3,882 kWh
Možná rekuperace	-1,889 kWh	-0,481 kWh
Bilance energie	-1,396 kWh	3,401 kWh
Celková bilance energie	2,005 kWh	

## ZÁVĚR

Na základě simulace jízdy tramvaje na vybraných traťových úsecích bylo prokázáno, že využití rekuperační brzdy uložením energie do akumulátoru energie dosahuje úrovně cca 50% spotřebované energie a hraje tedy významnou roli zejména v městské hromadné dopravě. Průzkumem traťových poměrů v síti MHD Bratislava byly vytipovány úseky tratě Centrum – Karlova Ves (-Dúbravka), které vykazují nejvýraznější a nejdelší spády a kde je předpoklad největšího využití rekuperace. Hlavním cílem simulace bylo stanovit množství energie na jedno zastavení a vytvořit tak podklady pro navazující práce, zejména potom simulace procesu nabíjení a vybíjení. V závislosti na provozních podmínkách (zejména na traťové rychlosti) je navrhovaná hodnota kapacity v rozmezí 2 až 5,4 kWh v případě zastavení jednoho vozidla. Doporučujeme provést další studie zahrnující provoz více vozidel podle předpokládaného jízdního řádu, včetně vzájemné polohy vozidel na trati a tedy různých okamžiků rozjezdů a brzdění.

## Poděkování, Acknowledgement

Článek byl podpořen z projektu / The article is supported by project ŠFEÚ ITMS 26220220078.

## LITERATURA

- [1] DP Bratislava: *Informácie o električkových tratiach*, [www.dpb.sk](http://www.dpb.sk), [online], dostupné 08/2013
- [2] Drábek, J.: *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Alfa Bratislava, SR, 1985.
- [3] Lieskovský, A., Myslivec, I., Šula, B.: *Moderní řídicí systémy hnacích vozidel Českých drah*. Automatizace, č. 8, 1996
- [4] Pácha, M., Pokorný, M., Pospíšil, M.: *Simulace rekuperace brzděné energie na tramvajových tratích MHD Bratislava*, VVÚK 2013, Nová Dubnica, 2013